

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tehnoloogiainstituut

Karl-Kristjan Kokk  
**DMA MÕÕTESEADE**  
Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:  
vanemteadur Andres Punning

Tartu 2016

## **Resümee/Abstract**

### **DMA mõõteseade**

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli konstrueerida DMA mõõteseade, mis oleks võimeline mõõtma õhukeste katsekehade dünaamilist elastsusmoodulit. Eesmärk oli, et seade deformeeriks katsekeha kuni 1 mm ning väljastab deformatsiooni ja jõu hetkväärtusi pingesignaalidena.

Töö sisulises pooles kirjeldatakse erinevaid jõuandureid. Samuti on seletatud, kuidas sensorite signaali võimendada ning miks see vajalik on. Kirjeldatakse valminud mõõteseadet ning selle tööpõhimõtet. Töö sisuline pool hõlmab ka kontrollplaati, selle komponente ning põhjendusi, miks need komponendid valiti. Juhtprogrammi osas on seletatud lahti graafiline kasutajaliides, mikrokontrolleri programm ja on kirjeldatud, kuidas on kasutatud PID-kontrolli meetodit reaajajas tagasisidega nii jõu- kui ka positsiooniandurilt.

**CERCS:** T125 Automatiseerimine, robotika, control engineering;

**Märksõnad:** jõuandur, mikrokontroller, viskoelastsus, dünaamiline elastsusmoodul

### **DMA measuring device**

The purpose of this project was to construct dynamic mechanic analysator on the basis on commercial dynamic mechanical analysators. The device had to be capable of measuring dynamic modulus of thin test objects. Requierments of this device are that it had to be able to deform the subject with amplitude of 1 mm and measure the output of two force sensors. Also it had to have a control loop feedback mechanism so that it could correct itself.

The main part of the project describes different kinds of load cells and how to amplify their output signals. Then there is an overview of the constructed dynamic mechanical analyser, its design and what its working principles are. Secondly this project describes the control unit of the constructed device. It also describes the microchips that are on it and gives reasons why those components were chosen. Lastly there is a description of the software that is on the microcontroller and also an explanation on how it works. Also there is an overview of graphical user interface.

**CERCS:** T125 Automation, robotics, control engineering

**Keywords:** load cell, microcontroller, viscoelascity, dynamic modulus

# Sisukord

Resümee/Abstract.....	2
1. Sissejuhatus .....	5
2. Kehade elastsust iseloomustavad füüsikalised suurused.....	7
2.1. Mehhaaniline pinge .....	7
2.2. Deformatsioon .....	7
2.3. Jäikus ja Young'i moodul .....	7
2.4. Nihkemoodul .....	8
2.5. Viskoelastsus .....	9
2.6. Dünaamiline elastsusmoodul.....	9
2.7. Youngi mooduli määramine .....	10
2.7.1. Tõmbekatse .....	10
2.7.2 Kolme punkti test.....	11
3. DMA mõteseadme NETZSCH DMA 242 E Artemis tööpõhimõte.....	12
4. Jõuandur .....	14
4.1 Jõuanduri tööpõhimõte .....	14
4.1.1. Mehaaniline.....	14
4.2.2. Elektriline.....	15
4.3. Jõuanduri signaali mõõtmine.....	18
5. DMA mõõteriist .....	20
5.1 Seadme üldine ehitus .....	20
5.2. Kontrollplaat.....	22
5.2.1. Mikrokontroller.....	22
5.2.2. Mikrokontrolleri ja arvuti vaheline ühendus üle FT230XS mikrokiibi .....	22
5.2.3. Trükkplaadi disain .....	23
5.2.4. Kontrollplaadi muud komponendid .....	23
6. Andurite kalibreerimine. ....	24

6.1 Jõuanduri kalibreerimine .....	24
6.2. Positsioonianduri kalibreerimine .....	25
7. Tarkvara .....	27
7.1. Mikrokontrolleri programm.....	27
7.2. PID-kontroller.....	28
7.3. Graafilise kasutajaliidese programm .....	28
8. Kokkuvõte .....	30
9. Kasutatud kirjandus.....	31
Lisad.....	33

# 1. Sissejuhatus

Eksperimentaalselt on tõestatud, et kui mingi füüsikalise keha mingi osa fikseerida ning mõnele teisele osale rakendada jõudu, siis selle objekti kuju muutub. Niisugust nähtust nimetatakse deformatsiooniks. Deformatsiooni suurus ja keha edasine käitumine olenevad selle keha materjalist, mõõtmetest, kujust, ning muidugi seda deformatsiooni esile kutsuva jõu suurusest. Edasise käitumise järgi eristatakse deformatsioone alljärgnevalt:

- Kui keha kuju muutumine on võrdeline mõjuva jõuga, ning keha esialgne kuju peale jõu mõju lõppemist taastub, siis nimetatakse sellist deformatsiooni elastseks.
- Kui keha kuju küll muutub, kuid järk-järgult, ning mitte võrdeliselt temale mõjuv jõuga, siis on deformatsioon viskoosne.
- Kui viskoosse deformatsiooni korral keha esialgne kuju peale jõu mõju lõppemist järk-järgult taastub, siis nimetatakse sellist deformatsiooni viskoelastseks.
- Kui jõud ületab mingi piirväärtuse ning keha esialgne kuju pärast jõu mõju lakkamist ei taastu, siis nimetatakse sellist deformatsiooni plastseks.

Kehade ning materjalide iseloomustamiseks ning võrdlemiseks erinevate deformatsioonide käigus on välja töötatud rida füüsikalisi suursi. Mõned neist, näiteks tugevus ja jäikus kehtivad konkreetse keha kohta ning sõltuvad keha materjalist, aga ka mõõtmetest ning kujust. Samas on füüsikalisi suursi, mis iseloomustavad ainult materjali, olenemata keha mõõtmetest ning kujust. Niisuguste füüsikaliste suuruste nimetused lõpevad sõnaga "moodul", näiteks elastsusmoodul, Young'i moodul. Kui keha deformeeriv jõud muutub ajas, siis liidetakse vastavale terminile ette sõna "dünaamiline", näiteks dünaamiline elastsusmoodul.

Nagu paljude füüsikaliste suuruste, nii ka elastsusmooduli kvantitatiivseks määramiseks on välja töötatud mitmesuguseid meetodeid ning nendel meetoditel põhinevaid mõõteseadmeid. Ent igal mõõteseadmel on omad nõuded ning piirid. Näiteks saab nihikuga mõõta küllalt täpselt laua paksust, aga Tallinna ja Tartu vahelist kaugust nihikuga mõõta ei ole mõistlik ega ole tulemus usaldatav. Nii on ka materjalide dünaamilise elastsusmooduli määramiseks saadaval väga täpseid seadmeid, mida nimetatakse dünaamiliseks mehhaaniliseks analüsaatoriks (*Dynamic Mechanical Analyzer*) (DMA). DMA tööpõhimõte seisneb uuritava objekti deformeerimisel perioodilise sinusoidaalse jõuga, mõõtes samal ajal tekitatud deformatsiooni ning deformeerimiseks vajalikku jõudu. Tööstuslikult saadaolevatel DMA seadmetel on omad piirid, need sobivad hästi näiteks terase elastsusmooduli määramiseks, aga ainult juhul kui on võimalik võtta sobiva paksusega terasleht. Aga kui uuritav terasleht ei ole sobiva paksusega, siis selle mõõtmiseks konkreetne seade ei sobi.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli konstrueerida tööstusliku DMA aparatuuri eeskujul seade materjalide dünaamilise elastsusmooduli mõõtmiseks paindel, kuid tingimusel et uuritavat objekti on saadaval ainult õhukese kile kujul pikkuse ja laiusega kuni mõni sentimeeter. Seade peab deformeerima uurimisobjekti amplituudiga kuni 1 mm, ning väljastama deformatsiooni ja jõu hetkväärtusi pingesignaalidena. Seadme eeldatav kasutusala on ionsete elektroaktiivsete polümeeride mehhaaniliste omaduste iseloomustamine, seega peaks olema mõõdetav elastsusmoodul vahemikus umbes 30-1000 MPa. [1]

Valminud seadme põhilisteks komponentideks on deformatsiooni tekitav bassvaljuhääldi, ja jõudu mõõtev isomeetiline jõuandur. Isomeetrilise jõuanduri eripäraks on tema omadus deformeeruda võrdeliselt temale mõjuva mõõdetava jõuga. Kasutades seda omadust, mõõdame deformatsiooni suurust teise samasuguse jõuanduriga. Niisugune nihke mõõtmise lahendus on väga odav, võrreldes näiteks põhimõtteliselt sama täpse laserkaugusanduriga. Bassvaljuhääldit juhtiv signaal tekitatakse mikrokontrolleri abil. Kasutades PID-kontrolli meetodit reaajas tagasisidega nii jõuandurilt kui deformatsiooni andurilt, on võimalik saavutada piisava täpsusega sinusoidaalne uuritava objekti deformatsioon jõuanduri suhtes, ehkki jõudu mõõtev jõuandur, millele uuritav objekt toetub, liigub samas sihis märgatava amplituudiga edasi-tagasi.

Käesolev bakalaureusetöö koosneb alljärgnevatest osadest:

- Ülevaade kehade elastsusomadusi iseloomustavatest füüsikalistest suurustest
- Tööstusliku DMA seadme NETZSCH DMA 242 E Artemis tööpõhimõte ja parameetrid
- Isomeetrilise jõuanduri tööpõhimõte ja selle signaali võimendamine
- Valmistatud DMA seadme tööpõhimõte
- Mikrokontrolleri riist- ja tarkvara
- Graafiline kasutajaliides
- Valmistatud DMA seadme kalibreerimine

## 2. Kehade elastsust iseloomustavad füüsikalised suurused

### 2.1. Mehhaaniline pinge

Kui keha mõjutatakse välise jõuga, näiteks surutakse kokku, siis ühteainsasse pinna punkti saab kogu jõudu rakendada ainult ideaaljuhul. Reaalselt mõjub jõud mingi pinna terves ulatuses. Mehaaniliseks pingeks nimetatakse jõu  $F$  ja selle pinna pindala  $S$  suhet:

$$\sigma = \frac{F}{S}. \quad (1)$$

Käesolevas peatükis nimetame seda "pingeks". Pinge ühikuks SI süsteemis on  $\frac{N}{m^2}$  ehk paskal.[2]

### 2.2. Deformatsioon

Kui kehale, millel on pikkus  $l$  rakendada piki selle telge jõud  $F$ , mille mõju on ühtlaselt jaotatud keha ristlõike ulatuses, siis keha saab juurde kasvu  $\Delta l$ , mille väärtus on kokkuleppeliselt positiivne tõmbel, aga negatiivne survele. Niisugust deformatsiooni nimetatakse absoluutseks deformatsiooniks, mille ühik SI süsteemis on meeter.

Deformeerimisel saab keha iga suvaliselt valitud element oma pikkusele võrdelise juurdekasvu. Seda nimetatakse suhteliseks deformatsiooniks  $\varepsilon$ .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (2)$$

Suhteline deformatsioon on ühikuta suurus.[2]

### 2.3. Jäikus ja Young'i moodul

Materjalile avaldatud pinge ja sellest tingitud deformatsiooni vahelise seose kirjeldamiseks kasutatakse mõisteid "jäikus" ja "elastsusmoodul". Jäikuse aluseks on Hooke'i seadus, mis ütleb, et elastsusjõud on võrdeline vedru pikkuse muutusega, kuid on sellele vastassuunaline.

$$F = -k\Delta l, \quad (3)$$

kus keha iseloomustavat suurust  $k$  nimetatakse keha jäikuseks. Jäikuse ühikuks SI süsteemis on  $\frac{N}{m}$ .

Hooke 'i seadust on võimalik avaldada ka pinge ja deformatsiooni kaudu:

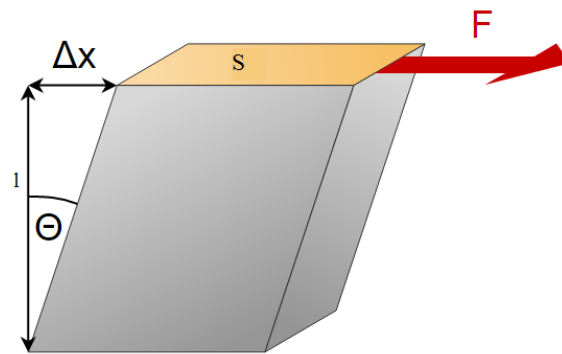
$$\sigma = E\varepsilon. \quad (4)$$

Võrdetegurit  $E$  nimetatakse elastsusmooduliks, mille ühik on sama mis pingel. Reaalsete materjalide elastsusmoodulite väärtuste suurusjärk on miljoneid paskaleid, seepärast kasutatakse tavaliselt mõõtühikut megapaskal (MPa).

Kui kehale mõjuva jõu suund on risti pinnaga, või kui võetakse arvesse ainult selle ristisuunalist komponenti, siis nimetatakse vastavat elastsusmoodulit normaalelastsusmooduliks  $e$ . Young'i mooduliks.[15]

## 2.4. Nihkemoodul

Sarnaselt eelpoolkirjeldatud pingega võib defineerida tangentsiaalpinge.



**Joonis 2.1** Nihkemoodul [3]

Tangentsiaalpinge tekib siis, kui jõud mõjub pinna puutuja suunas. Kui jõudude mõju on vastava keha pindala  $S$  ulatuses ühtlaselt jaotunud, siis tekib selle tahuga paralleelses suvalises lõikes tangentsiaalpinge  $\tau$ , mis avaldub:

$$\tau = \frac{F}{S}. \quad (5)$$

Tangentsiaalpinge ühik SI süsteemis on paskal.

Pingete mõjul deformeerub keha nii, et ülemine tahk nihkub alumise suhtes mingi suuruse  $\Delta x$  võrra. Kui jagada keha mõtteliselt horisontaalseteks kihtideks, siis iga kiht osutub naaberkihtide suhtes nihkunuks. Nihkedeformatsiooni korral pöördub iga horisontaalkiht oma naaberkihi suhtes mingi nurga  $\theta$  võrra. Ühikuta suhteline nihe  $\gamma$  avaldub:[20]

$$\gamma = \tan \theta = \frac{\Delta x}{l}. \quad (6)$$

Hooke'i seadus nihkel on nihkemooduli  $G$  abil esitatav kujul:

$$\tau = -G\gamma. \quad (7)$$



Nihkemooduli ühikuks SI süsteemis on Paskal. Materjalide nihke- ja elastsusmooduli vahel kehtib seos:

$$G = \frac{E}{2(1+\mu)}, \quad (8)$$

kus tegurit  $\mu$  nimetatakse Poissoni teguriks.[2]

## 2.5. Viskoelastsus

Eelnevates alapeatükkides käsitletu kehtib staatilisel juhul, s.t. kui jõud  $F$  ei muutu ajas, ning kui objekt on juba ära deformeerunud. Kui materjalile mõjuv pinge muutub ajas, siis olenevalt materjali viskoelastususest hakkab pinge ja deformatsiooni suhe sõltuma pinge avaldumise sagedusest.

Viskoelastsus on materjalide hübriidne omadus mis koosneb nii elastsest kui ka viskoossest käitumisest pinge rakendamisel. Viskoossed materjalid nagu mesi, deformeeruvad järk-järgult, kui neile pinget avaldada. Elastsed materjalid venivad, kui neid venitada, aga taastavad oma originaalse kuju kiiresti, kui neilt pinge eemaldada. Viskoelastsetel materjalidel esinevad mõlemad omadused ja seetõttu need materjalid ei deformeeru kohe neile mõjuva pinge tõttu. [23]

## 2.6. Dünaamiline elastsusmoodul

Dünaamiline elastsusmoodul või kompleksmoodul on materjalile rakendatud pinge ja sellest tulevneva materjali deformatsiooni suhe vibratsioonilises keskkonnas. Dünaamilise mooduliga on võimalik väljendada materjali viskoelastseid omadusi. Kui materjal on täiesti elastne, siis ta annab järgi hetkeliselt – sellele rakendatud vibratsioonilise pinge ja sellest tingitud deformatsiooni vahel ei teki faasinihet. Täiesti viskoosetel materjalidel tekib 90-kraadine faasnihe. Viskoelastsetel materjalidel on faasinihe 0 ja 90 kraadi vahel.

Avaldades deformatsiooni  $\varepsilon$  ja pinge  $\sigma$  sinusoidaalne muutumine:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin(\omega t), \quad (9)$$

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta), \quad (10)$$

kus  $\varepsilon_0$  ja  $\sigma_0$  on vastavad deformatsiooni ja pinge amplituudid, nurksagedus  $\omega = 2\pi f$ , kus  $f$  on deformatsiooni võnkumise sagedus,  $t$  on aeg ja  $\delta$  on faasinurk.

Dünaamilisel juhul eristatakse kahte elastsusmooduli komponenti – jääkmoodul ja kaomoodul. Jääkmoodul  $E'$  näitab materjali jäikust. See on võrreldav Youngi mooduliga staatilisel juhul.

$$E' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \cos \delta. \quad (11)$$

Kaomoodul  $E''$  iseloomustab materjali viskooseid omadusi. Seda kutsutakse ka imaginaarmooduliks või faasist väljas komponendiks:

$$E'' = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \sin \delta. \quad (12)$$

Dünaamiline elastsusmoodul  $E^*$  koosneb nendest kahest komponendist:[17]

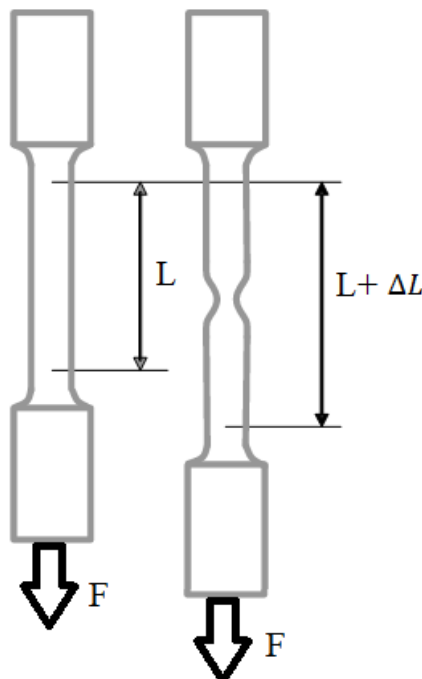
$$E^* = E' + iE''. \quad (13)$$

## 2.7. Youngi mooduli määramine

### 2.7.1. Tõmbekatse

Kõige tüüpilisem eksperiment Youngi mooduli määramiseks on tõmbekatse. Keha on mõlemast otsast kinnitatud. Kehale rakendatud jõu tõttu muudab see oma pikkust jõu rakendamise sihis. Katse tulemusena saadakse venituse ja pinge vaheline suhe:[9]

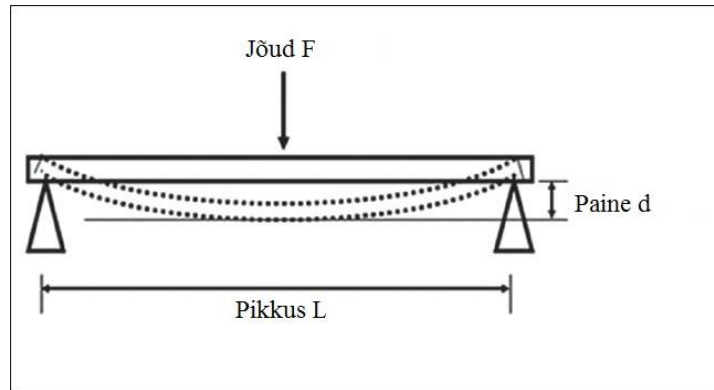
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (14)$$



Joonis 2.2. Tõmbekatse

### 2.7.2 Kolme punkti test

Kolme punkti test toimub nii, et katsekeha asetatakse kahele toetuspunktile ning rakendatakse sellele jõudu kolmandast punktist mis asub sümmeetriliselt, täpselt kahe toetuspunkti vahel, risti katsekehaga. Kui on teada katsekeha mõõtmed, kuju, rakendatud jõud ning paindeamplituud, on võimaliks leida Young'i paindemoodul E.[22]



**Joonis 2.3.** Kolme punkti test[8]

Euler-Bernoulli varda teooria kohaselt avaldub varda läbipaine  $d$  sümmeetrilisel koormamisel:

$$d = \frac{FL^3}{48EI}. \quad (15)$$

Suurus  $I$  on varda pindala inertsimoment, mis avaldub ristkülikukujulise ristlõike korral:[21]

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (16)$$

Viimase kahe valemi põhjal avaldub Youngi paindemoodul  $E$ :

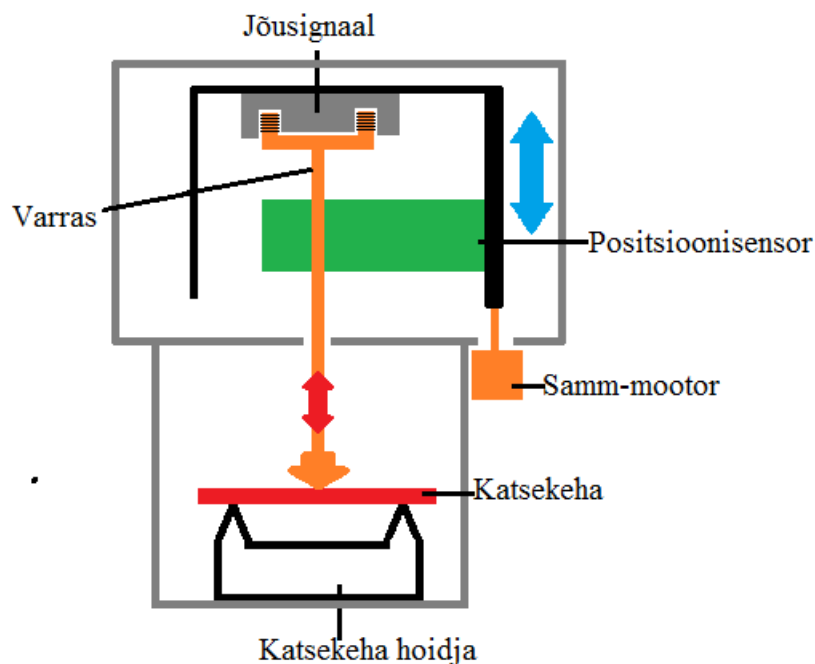
$$E = \frac{FL^3}{4dbh^3}, \quad (17)$$

kus  $b$  on katsekeha laius ja  $h$  on paksus.

### 3. DMA mõõteseadme NETZSCH DMA 242 E Artemis tööpõhimõte

Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituudis on olemas NETZSCH DMA 242 E Artemis. Tabelis 1 on toodud mõned selle parameetrid, joonisel 3.1 on tema põhiskeem.

See DMA mõõteseadme rakendab sinusoidset jõudu uuritavale objektile jäiga vertikaalse varda kaudu, mida liigutatakse elektromagnetilise solenoidi abil üles-alla amplituudiga kuni  $\pm 0,24$  mm. Uuritava objekti kinnitamiseks on mitmesuguseid klambreid, mille abil saab mõõta objekti reaktsiooni tõmbele, survele, paindele või nihkele kõikvõimalikes tuntud konfiguratsioonides. Vertikaalse varda positsiooni määratakse optilise positsioonisensoriga. Varda poolt katseobjektile avaldatav jõud mõõdetakse seda liigutavat solenoidi läbiva voolutugevuse kaudu. Selleks et vertikaalset varrast katseobjektist eemale viia või objektile staatilist deformatsiooni avaldada, liigutatakse solenoidi üles-alla samm-mootori abil. Niisugune keeruline lahendus võimaldab uurimisobjekti hoidva klambri fikseerida jäigalt seadme korpuse külge, kusjuures nii jõu kui deformatsiooni mõõtmine toimub seadme samm-mootoriga liigutatavas osas.



**Joonis 3.1.** NETZSCH DMA 242 E Artemis skeem.

Nagu näha tabelist 1, annab tootjafirma küll maksimaalse jõu, kuid mitte tundlikkust ega jõu alampiiri. Katsed on näidanud et mõõtes selle DMA seadmega IEAP materjale kolme punkti režiimis, materjal deformeerub, aga seadme poolt näidatud jõud on null. Ehkki lubatud elastsusmooduli mõõtepiirkond algab juba  $10^{-3}$  MPa-st, on selle mõõtmine võimalik ainult tõmberežiimis ja liiga suure deformatsiooni korral.

Seadme kasutamisel eelneb mõõteprotsessile mitu seadistusprotsessi, mille jooksul leitakse kõikvõimalikud vibratsioonid a) kui katsekeha puudub; b) kasutades eriti jäika katsekeha; c) kasutades tuntud elastsusparameetritega katsekeha. Saadud tulemusi kasutatakse hiljem andmete töötlemisel.

	NETZSCH DMA 242 E Artemis
Sagedusvahemik	0.01 Hz kuni 100 Hz
Maksimaalne jõud	24 N
Staatiline deformatsioon	20mm
Deformeeriva materjali suurus	Oleneb deformeerimise viisist, aga kolme punkti meetodi korral: 60x12x5
Maksimaalne kontrollitav deformatsiooni amplituud	$\pm 240 \mu\text{m}$
Elastusmooduli mõõtepiirkond	$10^{-3}$ kuni $10^6$ MPa

**Tabel 1.** NETZSCH DMA 242 E Artemis parameetrid.[10]

## 4.Jõuandur

Käesoleva bakalaureusetöö raames valminud DMA seadmes on kaks jõuandurit, mida kasutatakse nii jõu kui deformatsiooni mõõtmiseks.

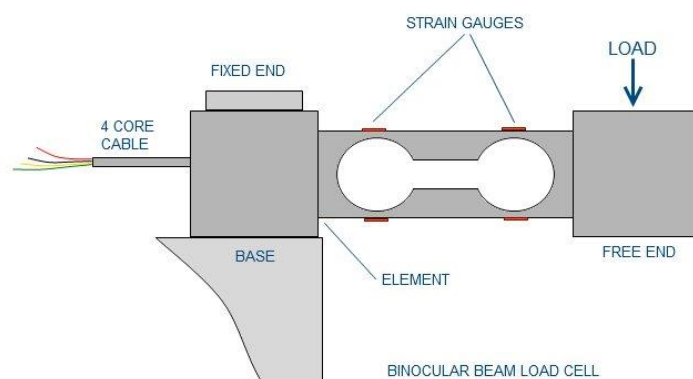
Jõuandureid on kahte tüüpi isomeetrilised ja isotoonilised. Isomeetiline jõuandur on konstrueeritud nii, et jõu mõõtmisel tema enda deformatsioon oleks minimaalne, ideaaljuhul null.

Isotooniline jõuandur töötab liigutuse peale. Jõud deformeerib Hooke'i seaduse järgi elastset keha, tegelikult mõõdetakse deformatsiooni, millest saadakse jõu signaal.[5]

### 4.1 Jõuanduri tööpõhimõte

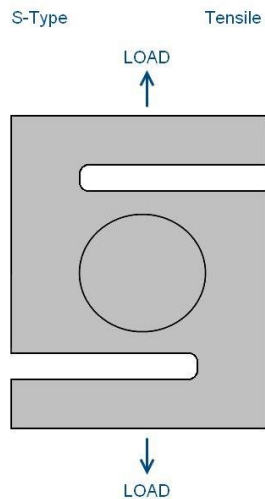
#### 4.1.1. Mehaaniline

Jõuandureid on väga palju erinevaid sorti ja neid on võimalik erinevalt kategoriseerida näiteks nende töö põhimõtte järgi, disaini järgi või nende väljundsignaali järgi.



**Joonis 4.1.** Binoklikujulise talaga jõuandur.[5]

Joonisel 4.1 kujutatud binoklikujulise talaga jõuandur on väga populaarne kaubanduslikes kaaludes. Kaks auku on disainitud selle jaoks, et anda tunduvalt kõrgem painde tundlikkus, kui see on tavalisel sirgel talal. Üks ots peab olema jäigalt kinni. Teisele otsale rakendatakse jõudu, mis tekitab deformatsiooni. Talaga koos deformeeruvad ka tensoandurid, mis selle küljes on. Tensoandurite täpsem seletus on järgmises alapeatükis.[19]



**Joonis 4.2.** S-tala jõuandur.[5]

S-tala jõuandur saab oma nime oma kuju pärast. Selline jõuandur suudab anda väljundi nii anduri kokkusurumisel kui ka mõlemast otsast tõmmates.

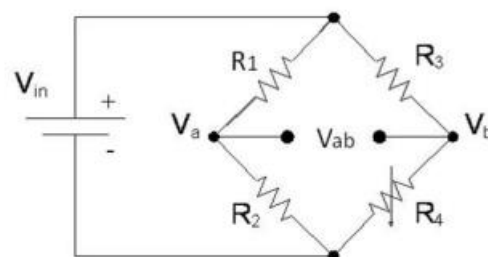


**Joonis 4.3.** Nupp jõuandur[7]

Nupp jõuandureid kasutatakse rakendustes, kus on vaja mõõta jõud, mis rakendatakse mööda telge. Jõud rakendatakse ümara nupu peale. [19]

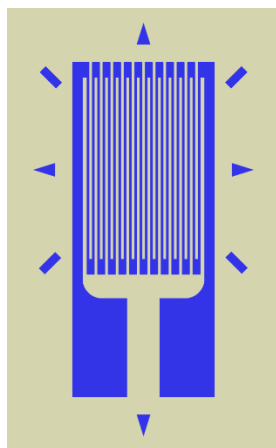
#### 4.2.2. Elektriline

Jõuandur koosneb tavaliselt neljast tensoandurist (ingl *strain gauge*). Tensoandur on seade, mille elektriline takistus muutub vastavalt sellele, kui palju on teda pikemaks venitatud. Tavaliselt on neli tensoandurit kinnitatud ühe tala külge. Kui talale jõudu rakendatakse, siis see deformeerub ja sellest tulenevalt ka tensoandurid omakorda deformeeruvad ning sealt saadakse elektriline signaal.



**Joonis 4.4.** Wheatstone'i veerandsild.[15]

Tensoandurid on ühendatud nii nagu näidatud joonisel 4.4. Niisugust skeemi kutsutakse Wheatstone'i sillaks. Joonisel 4.4 on kujutatud ühe tensoanduriga Wheatstone'i silda, aga on võimalik kasutada ka kahte, mida kutsutakse pool sillaks ja nelja, mida kutsutakse täissillaks.



**Joonis 4.5.** Tensoandur.[11]

Wheatstone'i sild on lihtne vooluring, mida kasutatakse, et mõõta väikesi muutusi takistuses. Klassikaline Wheatstone'i veerandsild koosneb neljast takistist, millest kolme väärtus on teada. Neljanda takisti väärtus on muutuv. Selline disain lubab vooluringi takistusel muutuda vastavalt mõnele välisfaktorile nagu näiteks jõuandurile mõjuv jõud. Jooniselt 4.4 on näha, et takistid  $R_1$  ja  $R_2$  töötavad pingejagurina. Takistid  $R_3$  ja  $R_4$  moodustavad teise pingejaguri paralleelselt  $R_1$  ja  $R_2$  ga. Vooluring on tundlik pingete vahele punktides  $V_a$  ja  $V_b$ . Nende kahe punkti vahelist pinget on võimalik leida valemiga:

$$V_a - V_b = V_{ab} = \left( \frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) V_{in}. \quad (18)$$

Kui  $R_1 R_3 = R_2 R_4$  siis  $V_{ab} = 0$ . Üldiselt kehtib Wheatstone'i sillaga deformatsiooni mõõtmisel kaks kuldreeglit:



- 1) Üksteise kõrval olevate takistite väärtused liidetakse.
- 2) Üksteisega diagonaalis oleva takisti väärtused lahutatakse.

Kui  $R_1=R_2=R_3=R_4=R$  ja takisi takistuse muutud on väiksemad, kui nende nominaalne väärtus, siis seda suhet on võimalik esitada ka valemiga:

$$\Delta V_{ab} = \frac{V_{in}}{4} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad (19)$$

Sellest valemist on näha, et kui kõikide takistite muutud võrduvad nulliga, siis väljundpinge on samuti võrdne nulliga. Selle põhjal saab tuletada:

$$\Delta V_{ab} = V_{in} \left| \frac{\Delta R}{R} \right|, \quad (20)$$

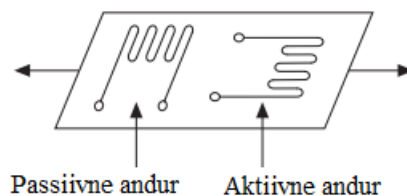
mis tähendab, et väljundpinge muut on võrdeline takistuse muutuga. Selle silla tensomeetriline tundlikkus avaldub valemiga:

$$S = \frac{\Delta V_{ab}}{V_{in}} = \frac{n}{4} k \varepsilon, \quad (21)$$

kus  $k$  on tensoanduri faktor ja  $n$  on tensoandurite arv. Tensoanduri faktor on defineeritud kui elektrilise takistuse muudu ja suhtelise deformatsiooni suhe: [13]

$$k = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}. \quad (22)$$

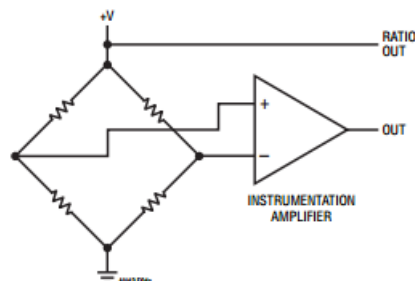
Ideaaljuhul muudab tensoanduri takistust ainult sellele mõjuv jõud. Reaalsuses, aga tensoandurit ja materjali, mille peale tensoandur on liimitud, mõjutab temperatuur. Selle kompenseerimiseks on tensoanduriga paigutatud risti veel üks passiivne andur (joonis 4.6.). Passiivset andurit deformatsioon ei mõjuta, aga temperatuur mõjutab mõlemat tensoandurit täpselt samamoodi. Temperatuuri muutused mõlemas andurid on identsed, aga see ei mõjuta nende kahe anduri takistuste suhet ega ka  $V_{ab}$ -d.[12]



**Joonis 4.6.** Temperatuuri efekti eemaldamiseks kasutatud passiivne andur.[12]

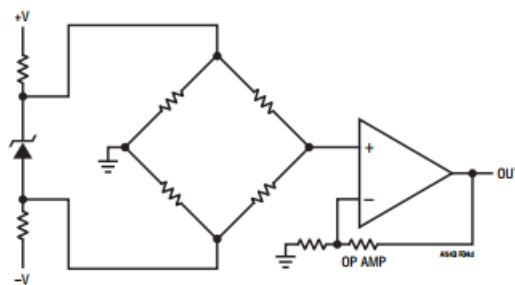
### 4.3. Jõuanduri signaali mõõtmine

Eelmises alapeatükis räägitud Wheatstone'i sild on väga palju tähelepanu saanud elektriline skeem. On mõeldud välja erinevaid tehnikaid, et parandada silla lineaarsust, tundlikkust ja stabiilsust.



**Joonis 4.7.** Instumentaalkõimendiga silla kõimendus.[18]

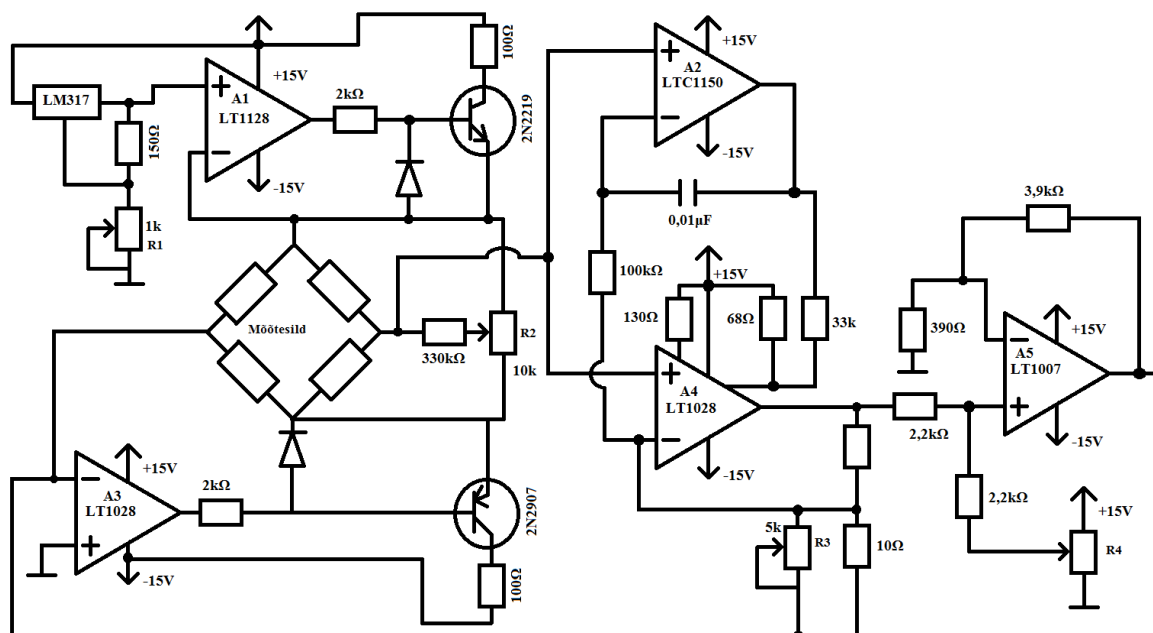
Joonisel 4.7. on toodud üks mõõtesilla signaali kõimendamise viisidest. Silla mõlemad väljundid on ühendatud instumentaalkõimendi sisendiga. Selle lahenduse tugevuseks võib lugeda tema lihtsust ning head sünfaasse signaali mahasurumise tegurit, mis on üle 110dB. Kui on vaja täpseid tulemusi, siis see lahendusi ei pruugi parim olla, sest pinget kipub ajapikku nihkuma ning kõimendus stabiilsus pole ka kõige parem.



**Joonis 4.8.** Operatsiooni kõimendiga mõõtesilla kõimendus[18]

Joonisel 4.8 on kujutatud Zener diodi ja operatsioonivõimendiga mõõtesilla kõimendust. See on ka kõrge sünfaasse signaali mahasurumise teguriga. Suureks miinuseks on, aga Zeneri diod, mis tekitab viga kõimenduses.[18]

Ideaalselt, kui sild on tasakaalus ehk mingisugust jõudu ei ole sillale rakendatud, peaks väljundpinge olema null. Reaalselt, aga silla takistite erinevuse tõttu tekib mingisugune väljundpinge. On olemas mitu meetodit, kuidas sellest väljundpingest elimineerida. Üks neist on tarkvaraline, mis tähendab, et enne kui mingit jõudu andurile rakendatakse tehakse mitu mõõtmist ning arvestatakse sellega, kui hilisemaid arvutusi tehakse. Selle meetodi nõrgaks küljeks on, et väljundpinget tegelikult sillast ei eemaldata ja seetõttu limiteerib mõõtmiste ulatust. [12]



**Joonis 4.9.** Jõuanduri võimendi skeem

Teise meetodi puhul kasutatakse potentsiomeetrit, et füüsiliselt korrigeerida silla väljundpinge nulliks. Joonisel 4.9. on näha mõõtesilla ette paigaldatud R2 potentsiomeeter, millega on võimalik silla väljundit korrigeerida.

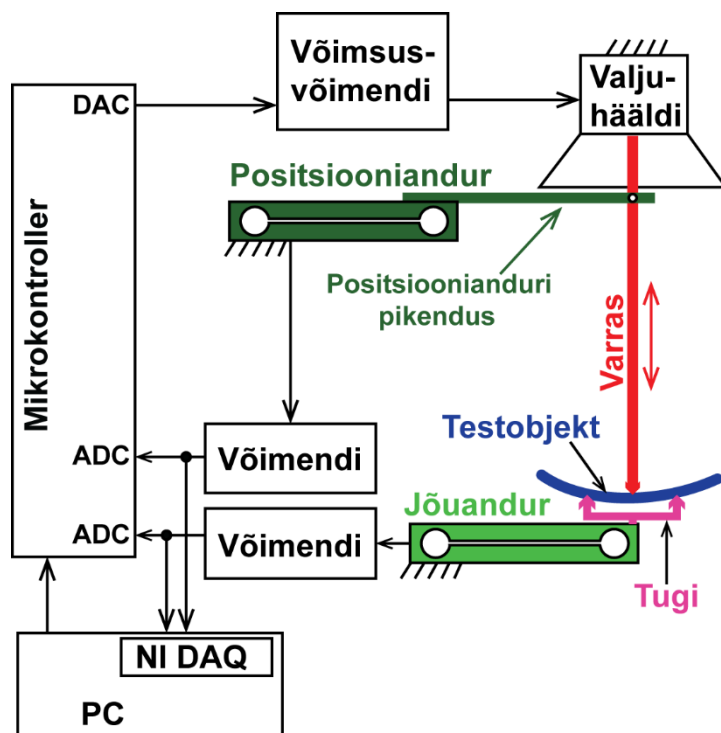
Tensoandurite ja mõõtesilla väljundpinge on suhteliselt väike. Enamus tensoandurite mõõtesilla väljund on umbes 10 mV ühe toitepinge voldi kohta. Toitepinge  $\pm 15V$  korral on väljundsignaal umbes 300mV. Seepärast kasutatakse operatsioonivõimendeid, et võimendada signaali, saada kõrgem mõõtmise lahutus ning saavutada parem signaali ja müra suhe.[12]

Joonisel 4.6. on skeem, mida on kasutatud jõuandurite signaali mõõtmiseks käesolevas seadmes. LT1007 on DC-DC muundur. Sellega on võimalik sättida alalisvoolupinget R4 potentsiomeetrist. R1 potentsiomeetrist on võimaliks sättida LM317 pingeregulaatori väljundpinget, mis läheb A1 operatsioonivõimendisse. R3 potentsiomeetrist on võimalik sättida A4 operatsioonivõimendi sisendisse mineva signaali võimendust.

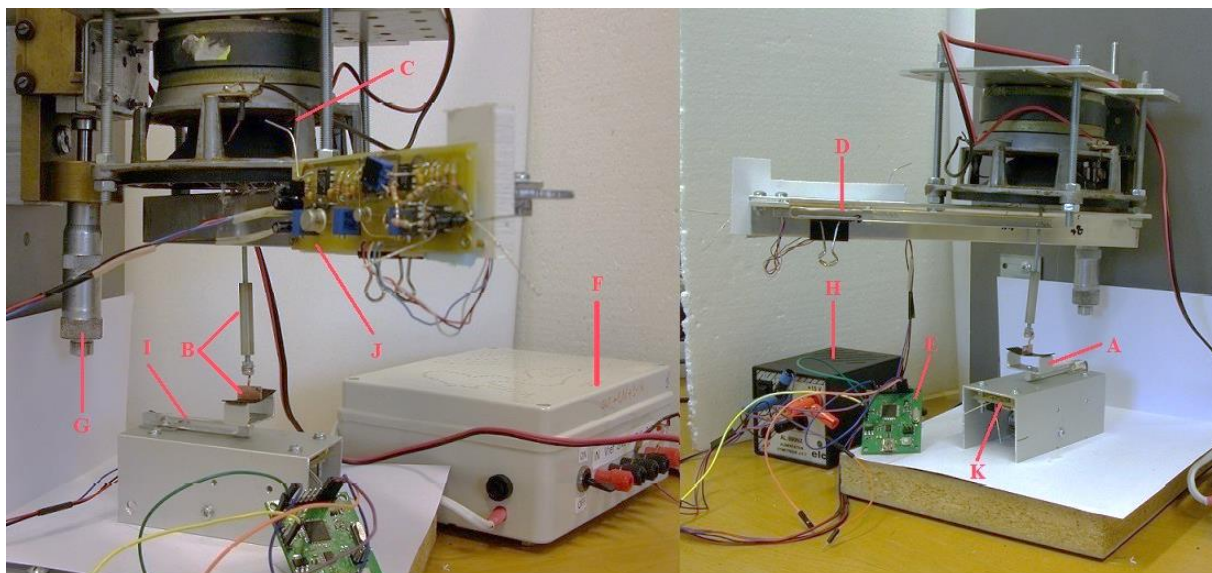
Kui mõõtesillalt tuleb väljundpinge, siis see läheb nii A2 kui ka A4 operatsioonivõimendisse. A2 mõõdab A4 sisendi viga ja korrigeerib selle *offseti* mõne mikrovoldi võrra. Samuti parandab see ka mõõtesilla juures oleva LT1028 kivi kõrvalekalde vea. See on selle jaoks, et parandada alalisvoolukõrvalekallet.[18]

## 5. DMA mõõteriist

### 5.1 Seadme üldine ehitus



Joonis 5.1. DMA mõõteriista tööpõhimõte.



Joonis 5.2. DMA mõõteriist.

Joonistel 5.1 ja 5.2 on näha DMA seadme alljärgnevad komponendid:

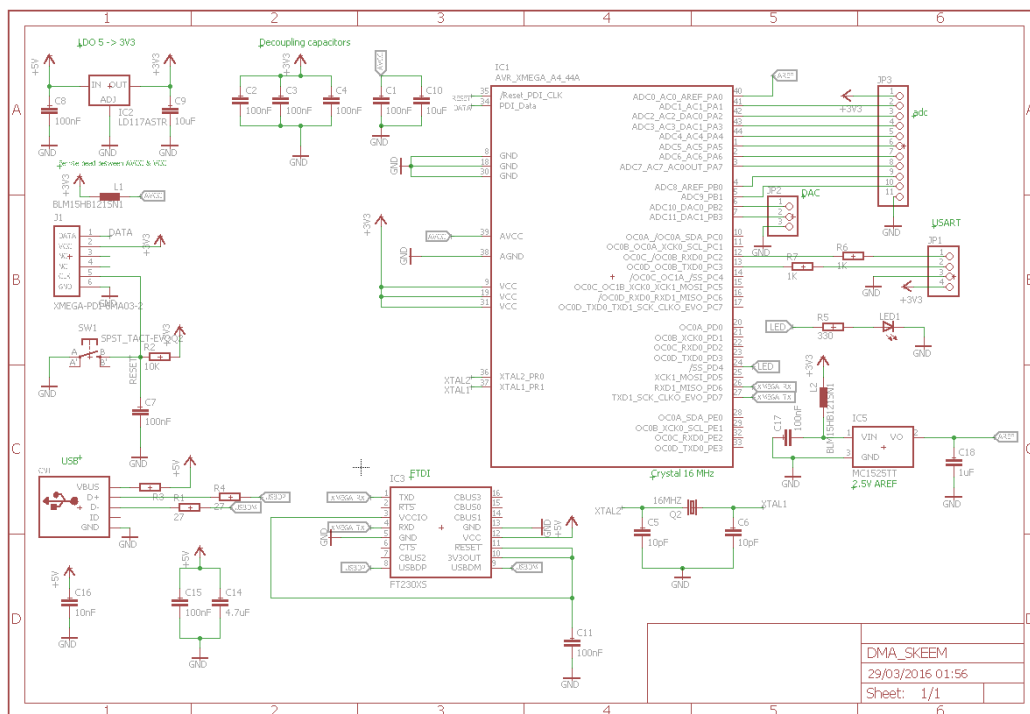
- A. Testobjekt toetub horisontaalselt kahe laia kuid terava tugipunkti kaudu jõuandurile. Tugipunktide omavaheliseks kauguseks on praegu 2,9 cm. Tugipunktide teravus on oluline, sest siis on võimalik täpselt määrata, mis punktides jõud testkehale mõjub.

- B. Kolmandasse punkti avaldab jõudu horisontaalne lai terav tugipunkt, mida liigutab üles-alla vertikaalne varras.
- C. Vertikaalne varras pannakse liikuma bassivaljuhääldi 25 ZT-1-ga, (mille takistus on  $4\Omega$ ). Varras on risti kinnitatud valjuhääldi membraani tsentris oleva ringikujulise plastmassitüki külge, mis omakorda on kinnitatud bassivaljuhääldi membraani külge liimipüstoliga.
- D. Varda positsioon määratakse positsioonianduriga, milleks on isotooniline jõuandur. Jõuandur on ühest ühest otsast jäigalt kinnitatud valjuhääldi külge. Selleks on valjuhääldi külge horisontaalselt kinnitatud pikk tala, mille külge jõuanduri jäik ots on kinnitatud. Jõuanduri teise otsa külge on kinnitatud 15 cm pikkune pikendus, mis ulatub vertikaalse vardani. Pikenduse eesmärk on isotoonilise jõuanduri liikumisamplituudi suurendamine. Vertikaalne varras ja pikendus on omavahel ühendatud nõellaagriga et nad liiguksid koos. Vertikaalse varda liikumist piiravad mõlemale poole horisontaalset tala kinnitatud reguleerimismutrid. See on selle jaoks, et ei kahjustaks andurit kui varras peaks liikuma anduri jaoks liiga palku üles või alla. Mutrite vahekaugus on 1 mm. Pikendus võimendab varda liigutust 3,2 korda. See tähendab, et kui varras liigub 1 mm üles alla, siis jõuandur deformeerub 0,3125 mm .
- E. Bassivaljuhääldi saab oma liikumiseks vajaliku pingsignaali ATxmega32A4-AUR mikrokontrolleri digitaal-analoog muundurist. Mikrokontroller teeb PID-kontrolleri arvutusi vastavalt analoog-digitaal muunduri lugemitele, mis saadakse positsiooni- ja jõusensorite võimendite väljundist.
- F. Mikrokontrolleri maksimaalne väljundvool on 50 mA. Kuna see ei ole piisav, et bassivaljuhääldit korralikult liigutada, siis on nende kahe vahele pandud võimsusvõimendi OPA548 standardlülituses, mis võimendab ning nihutab vajalikul määral mikrokontrolleri digitaal-analoog muundurist saadud signaali.
- G. Bassivaljuhääldit, jõusensorit ja selle võimenduplaati on võimalik käsitsi liigutada üles-alla mikromeetrikruviga, mille täpsus on 50 mikromeetrit ja käik on 40 mm. Selline lahendus võimaldab vertikaalvarrast täpselt paigutada katsekehale ning avaldada sellele mehaanilist eelpinget.
- H. Jõuandurid ja nende võimendid saavad oma toite AL890NX toiteploki, mille väljundpinge on  $\pm 15$  volti.
- I. Kindla aluse külge kinnitatud jõusensor.
- J. Nihkesensori võimendi.
- K. Jõusensori võimendi.

Arvutisse on loodud vastav graafiline kasutajaliides, kust on võimalik määrata ära signaali kuju, amplituud, sagedus, tsüklite arv, nullpunkt, kust signaali genereerima hakatakse. Need andmed edastakse USB A – USB micro B kaabliga. Mikrokontroller saab oma toite arvutist USB kaudu.

Jõu- ja positsioonisensorite signaalid loetakse arvutisse andmehõive seadmega, praegu on selleks NI USB-6218.

## 5.2. Kontrollplaat



Joonis 5.3. Kontrollplaadi elektroonika skeem

### 5.2.1. Mikrokontroller

Selle töö jaoks oli vaja mikrokontrollerit, millel oleks olemas taimer, USART, kaks A/D muunduri kanalit ning üks D/A muunduri kanal. Kõik need vajadused täitis 8/16-bitine ATxmega 32A4-AUR. Mikrokontrolleri toitepinge on 3,3 V ning on TQFN korpuses. Samuti on sellel 32 KB välmälu, kuhu koodi salvestada. [4]

### 5.2.2. Mikrokontrolleri ja arvuti vaheline ühendus üle FT230XS mikrokiibi

Arvuti ühendatakse kontrollplaadiga USB juhtmega. Kõige kergem viis, kuidas andmevahetust mikrokontrolleri ja arvuti vahel realiseerida, on kasutada FT230XS mikrokiipi. Arvutiga

ühendamiselt tekitab ta virtuaalse järjestikpordi. Mikrokiip muudab USB signaalid UART signaalideks. Mikrokiibi toitepinge on 5V, mis tuleb arvutist.

### **5.2.3. Trükkplaadi disain**

Signaali rajad on 0,4mm laiad. Voolurada on 0,5mm lai. Selle jaoks, et elektroonikat ei mõjutaks elektromagnetlained ning soojus, mis plaadi töö jooksul tekib, on trükkplaadi alumise külje rajad tehtud võimalikud lühikesed (lisa 1), et vältida alumise GND signaali ülemäära suurt killustust. Trükkplaadi nurkades on augud, millega on võimalik plaat pärast karpi kinnitada. Plaadil on paigutaud pistikud, mis on ühendatud mikrokontrolleri ADC ja DACi väljundviikudega. Plaat telliti Hiina firmast Itead.

### **5.2.4. Kontrollplaadi muud komponendid**

AVCC ja VCC vahele on pandud ferriitdrossel (ingl *ferrite bead*), et VCC müra ei segaks AVCCd.

Mikrokontrolleri ühe väljundviigu külge on ühendatud MCP1525, mis annab 2,5V pingereferentsi ADCle ja DACile.

Kontrollplaadil on LD117ASTR lineaarne pingeregulaator, mis muudab 5V 3.3Vks. See on vajalik, sest mikrokontroller töötab pingevahemikus 1.6V-3.6V.

Mikrokontrolleri saab 16Mhz taktsageduse HC-49S välist kvartskristalli kasutades.

## 6. Andurite kalibreerimine.

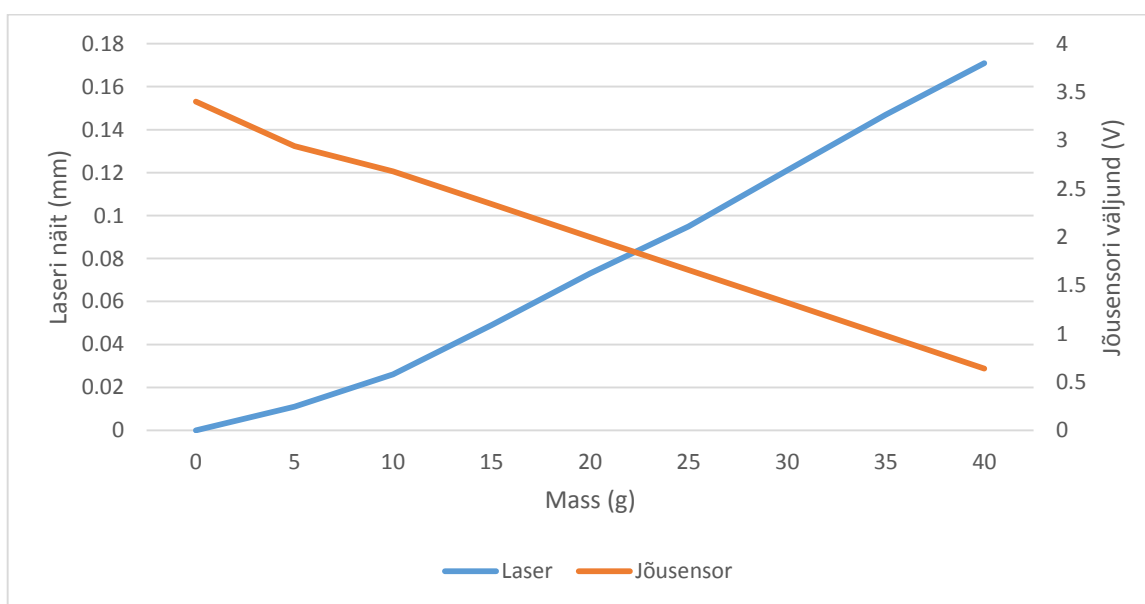
Järgnevatel alapeetükkidel kirjeldatakse andurite kalibreerimise protsessi ning on esitatud saadud tulemused. Kalibreeriti mõlemaid andureid kaks korda nädala ajase vahega, et näha, kas andurite näidud hakkavad ajapikku muutuma ning saada esialgne ettekujutus, kui tihti on jõuandureid vaja kalibreerida.

### 6.1 Jõuanduri kalibreerimine

Kui valjuhääldi abil liigutada vertikaalset varrast üles-alla, siis katseobjekt deformeerub, kuid jõuandur annab järgi. Tegelikult aga on vaja teada katseobjekti deformatsiooni jõuanduri suhtes. Teades kui palju jõuandur liigub vastavalt talle mõjuvale jõule, saab mikrokontroller seda kompenseerida. Jõuanduri deformatsiooni mõõtmiseks kasutati lasermõõdikut Keyence LK-G82. Töö käigus pandi kaaluvihte jõuanduri peale ja siis laseriga mõõdeti, kui palju see alla liigub. Sensori väljundiks on elektriline signaal, aga on vaja teada, kui suur pinge vastab mingile suurusega raskusele, et oleks võimalik talle mõjuvat jõudu arvutada.

Kalibreerimisel tehtud sammud:

- 1) Pinge mõõtmine, kui jõuandurit raskus ei mõjuta.
- 2) Kaaluvihi asetamine jõuandurile
- 3) Laseri ja sensoriväljundpinge mõõtmine
- 4) Sammude 2 ja 3 kordamine
- 5) Graafiku joonistamine ja sirge arvutamine



Joonis 6.1. Jõuanduri esimese mõõtmise tulemused

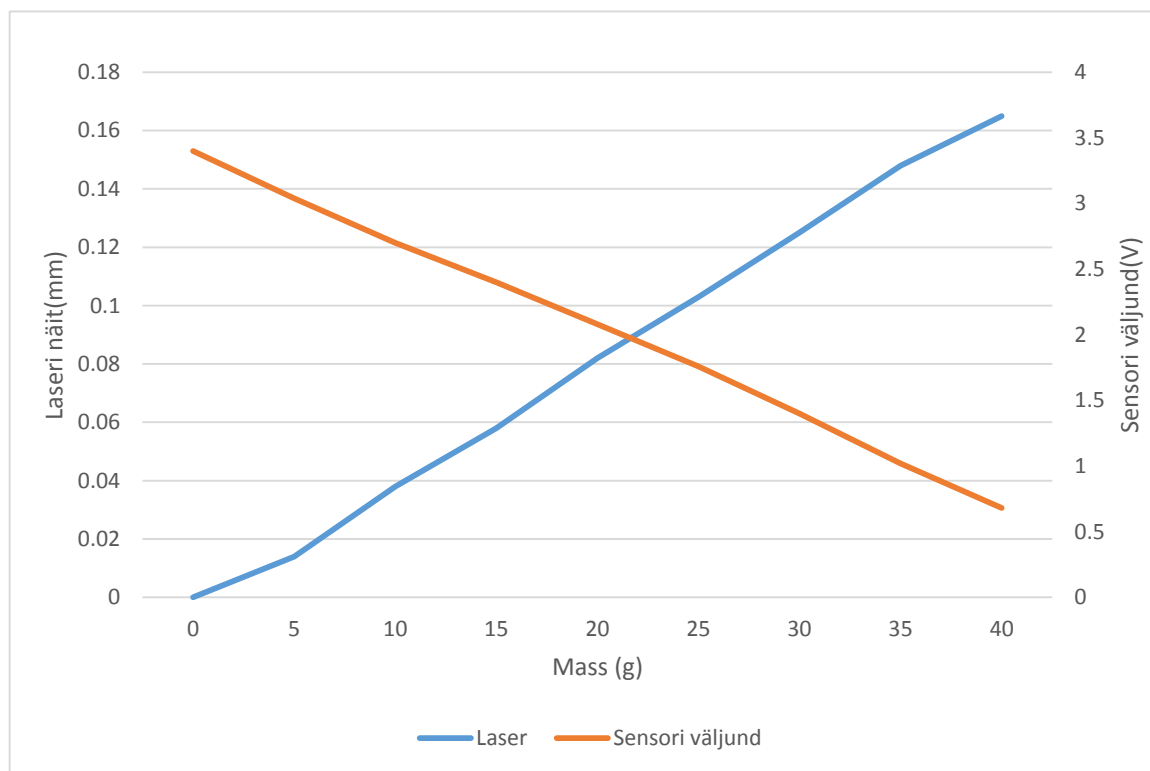


Massi ja jõusensori väljundit kirjeldab võrrand

$$y = -0,069x + 3,4.$$

Massi ja laseri näitu kirjeldab võrrand

$$y = 0,004275x.$$



**Joonis 6.1.** Jõuanduri teise mõõtmise tulemused

Nädal aega hiljem teostatud kalibreerimise tulemused olid suure täpsusega samasugused:

$$y = -0,068x + 3,4$$

ja

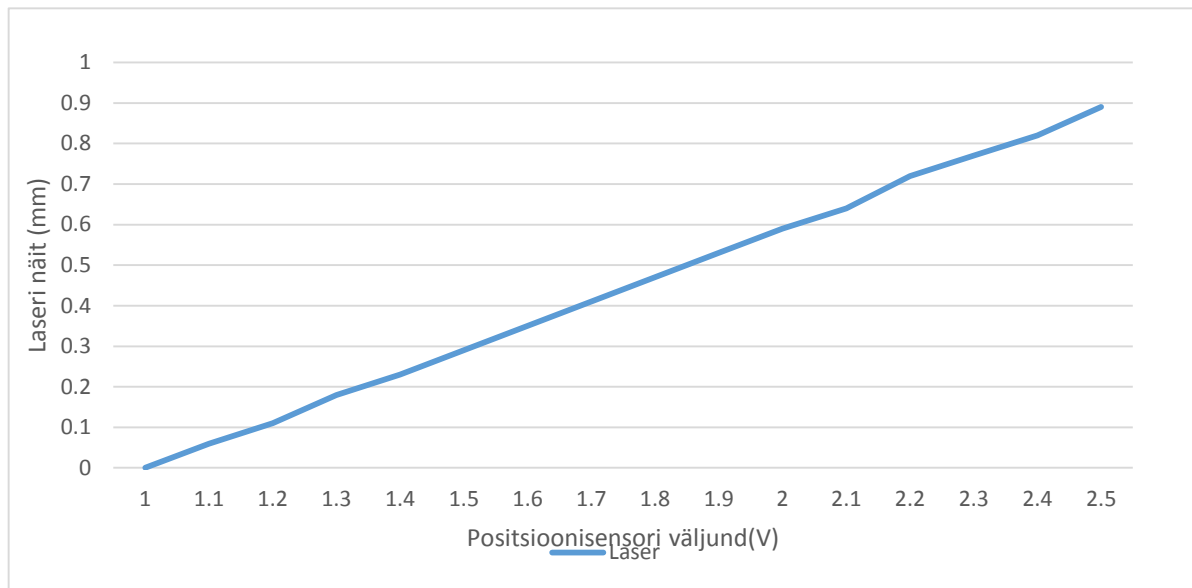
$$y = 0.004125x.$$

## 6.2. Positsioonianduri kalibreerimine

Nihkeanduri puhul on meil jällegi vaja teada, kui suur pinge vastab mingile liigutusele. Nihke mõõtmiseks kasutati jälle lasermõõdikut. Vertikaalvarda külge kinnitati üks tala ning lasermõõdik mõõtis selle liikumist. Kalibreerimiseks tehtud sammud:

- 1) Mikrokontrollerilt andi bassivaljuhäldile konstantne pinge ja salvestati laseri näit.
- 2) Suurendati pinget 0,1 voldi võrra, salvestati laseri näit.
- 3) Sammu 2 korrati 15 korda, et oleks piisav arv tulemusi.

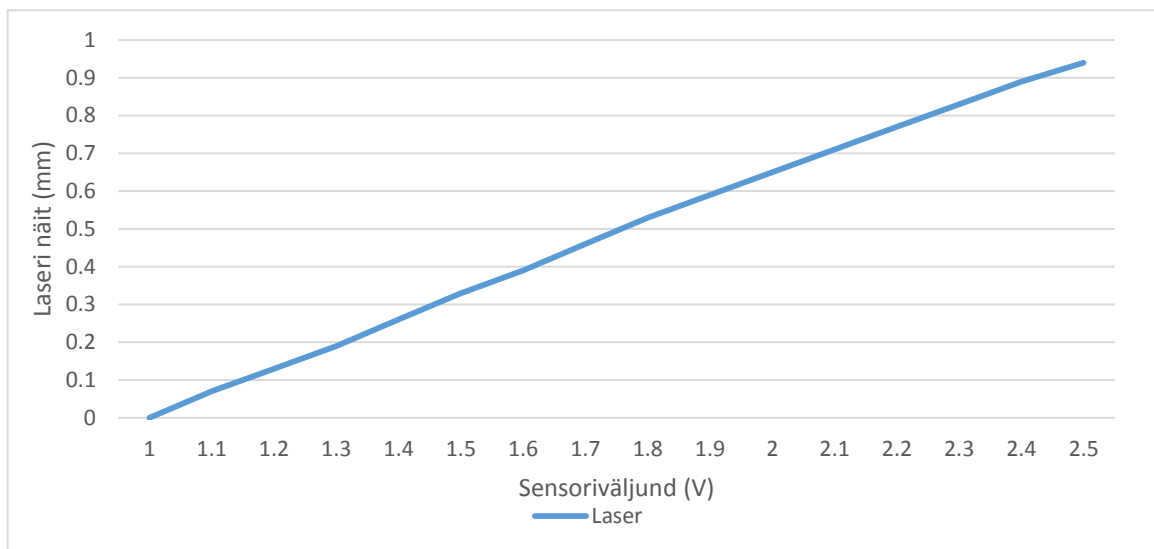
4) Joonistati graafik ja arvutati sirge võrrand.



**Joonis 6.3.** Nihkesensori ja laseri näidud esimesel mõõtmisel

Sirge võrrand, mis iseloomustab nihkesensori ja laseri näitu:

$$y = 0,593x - 0,593.$$



**Joonis 6.4.** Nihkesensori ja laseri näidud teisel mõõtmisel

$$y = 0,6267x - 0,6267.$$

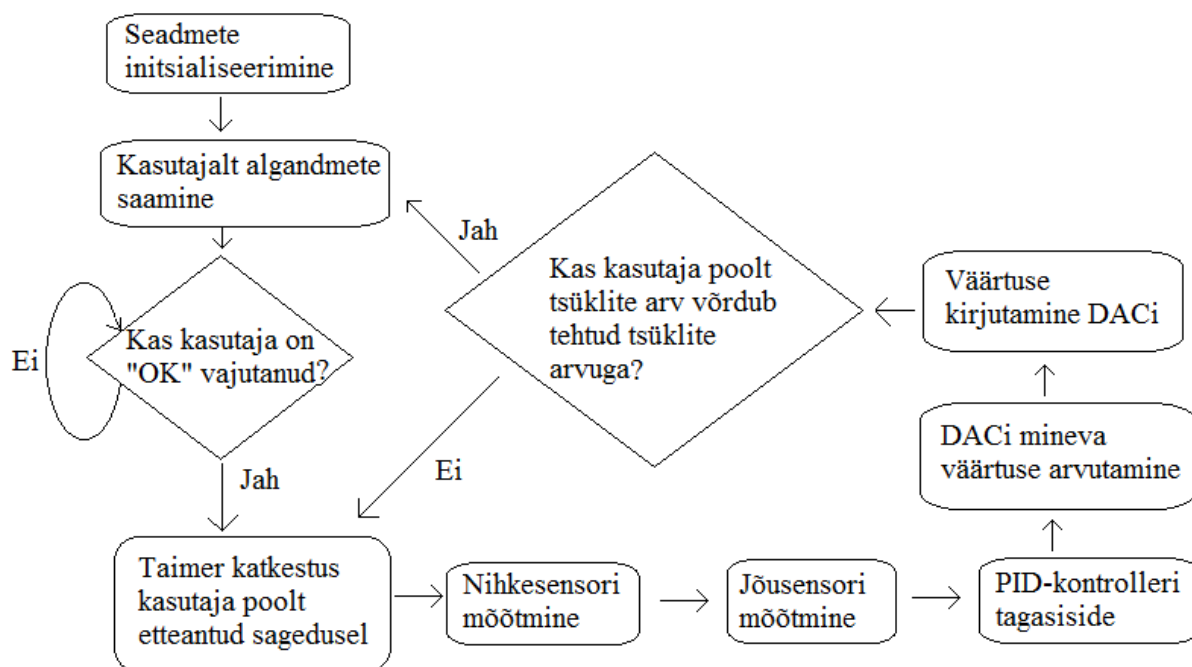
Mõõtmistulemuste põhjal võib järeldada, et jõusensori näit püsis nädala jooksul väga stabiilselt, aga nihkesensori näit muutus natuke, ehkki nii jõuandurid kui nende võimendid olid põhimõtteliselt identsed.

## 7. Tarkvara

Mikrokontrolleri programm on kirjutatud C keeles Atmel Studio keskkonnas ning seda programmeeritakse läbi PDI-liidese kasutades AVRISP mkII programmaatorit. PDI liides (ingl *program and debug interface*) on Atmeli poolt välja arendatud liides, millega on võimalik mikrokiipe programmeerida ja vigu parandada. Kasutajaliides on kirjutatud Pythonis.

### 7.1. Mikrokontrolleri programm

Kõigepealt mikrokontroller initsialiseerib USARTi, ADC, DAC ja taimeri. Siis hakkab ootama kasutajalt andmeid. Esimesena loetakse sisse signaali tüüp,. Sealt edasi amplituud, lähtekoha, kust signaali hakatakse ehitama, tsüklite arv ja periood. Seejärel pannakse paika taimeri perioodi register. Viimane määrab ära, mis sagedasti taimer katkestusi tuleb ette. Iga taimeri katkestuse ajal loetakse sensorite väljundid ADCsse. Seejärel toimuvad PID-kontrolleri arvutused, et vaadata, kas need on õiges kohas ja vastasel juhul parandada. Parandus liidetakse juurde väärtusele, mis DACi kirjutatakse. Seejärel kontrollitakse, kas on tehtud kasutaja poolt ette antud tsüklite arv. Kui ei ole, siis liidetakse tehtud tsüklite arvule üks juurde, vastasel juhul seade peatab oma töö ning hakkab jälle kasutajalt algandmeid ootama.



Joonis 7.1. Mikrokontrolleri koodi plokk skeem

## 7.2. PID-kontroller

Positsioonianduri puhul on PID-kontrollerit tehtud P ja D osa. P ehk proportsionaalne, mida suurem on viga, seda rohkem seda parandatakse ja D ehk derivatiivne osa, mis võtab arvesse kiirust, kus viga muutub.

P osas kõigepealt loetakse analoogväljund, siis võrreldakse seda sellega, mis olema peaks. Seejärel korrutatakse läbi konstandiga  $K_p$ . D osas võetakse eelmine mõõtmistulemus ning lahutatakse sealt maha praegune mõõtmistulemus. Seejärel jagatakse saadud tulemuse mingi konstandiga. Peale seda liidetakse mõlemad vead kokku ja siis olenevalt tulemusest jagatakse mingi konstandiga jälle läbi. Mida väiksem viga, seda väikema konstandiga jagatakse. Katsetamise käigus selgus, et kui viga liiga palju parandada, siis signaal jääbki õige väärtuse juures üles alla liikuma. Lõpuks liidetakse saadud tulemus DACi minevale väärtusele juurde. Iga signaalipunkti juures leitakse viga ja liidetakse kokku. Tsükli lõpus jagatakse signaalipunktide arvuga, et leida keskmine viga ja siis see liidekase DACi minevale väärtusele juurde. Keskmine viga liidetakse iga signaalipunkti juures DACi minevale väärtusele juurde, aga arvutatakse ainult iga tsükli lõpus.

Jõuanduri puhul ADC lugemist lähtuvalt mikrokontroller teab, kui palju jõuandur parasjagu järgi annab ning lahutab DACi minevast väärtusest selle arvu maha.

## 7.3. Graafilise kasutajaliidese programm

Graafilise kasutajaliidese programm on realiseeritud Pythonis 3.2.3. Töö käigus on kasutatud pyserial teeki, mis võimaldab juurdepääsu jadaliidesele.[16] Graafiline kasutajaliides laseb valida erinevate signaalitüüpide vahel ning sättida amplituudi, tsüklite arvu, nullpunkti, kust signaali ehitama hakatakse ja signaali sagedust. Pythonis programmis pannakse kõik arvulised väärtused kujule, mis mikrokontrollerile sobib. Graafilisel kasutajaliidesel on samuti olemas “stop” nupp, mis peatab seadme töö, “saada” nupp, mis saadab sisestatud andmed ja “ok” nupp, mis saadab seadmele käsu tööga alustada. Stop nupu vajutamisel läheb mikrokontroller USARTi katkestus rutiini ning seiskab masina töö ja seejärel jääb kasutaja algandmeid jälle ootama.

The image shows a software window titled "DMA" with a blue header bar. Inside the window, there are five input fields arranged vertically, each with a label to its left: "Signaal:" with a dropdown menu showing "Siinus", "Periood:", "Amplituud:", "Tsüklite arv:", and "Offset:". Below these fields are three buttons stacked vertically: "STOP", "Saada", and "OK". The window has standard Windows-style window controls (minimize, maximize, close) in the top right corner.

**Joonis 7.2.** Graafiline kasutajaliides

## 8. Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli konstrueerida DMA mõõteseadet, mis oleks võimeline mõõtma õhukeste katsekehade dünaamilist elastsusmoodulit. Eesmärk oli, et seade deformeeriks katsekeha kuni 1mm ning väljastab deformatsiooni ja jõu hetkväärtusi pingesignaalidena. Seade ehitati, et iseloomustada ioonsete elektroaktiivsete polümeeride mehhaanilisi omadusi.

Töö sissejuhatavas osas seletatakse lahti mehaanilise pinge, deformatsiooni, jäikus ja Youngi mooduli, nihkemooduli, viskoelastsuse ja dünaamilise elastsusmooduli mõisted. Samuti seletatakse, kuidas määrata Young'i moodul tõmbekatse ja kolme punkti katsega. Räägitakse ka Tartu Ülikooli Tehnoloogia instituudis asuvast NETZSCH DMA 242 E Artemisest ning, miks see alati ei sobi mõõtmiste tegemiseks.

Töö sisulises pooles kirjeldatakse isomeetrilise ja isotoonilise jõuandurite erinevusi ning, kirjeldatud on ka erinevaid jõuandureid. Samuti on seletatud, kuidas sensorite signaali võimendada ning miks see vajalik on. Kirjeldatakse valminud mõõteseadet ning selle töö põhimõtet. Töö sisuline pool hõlmab kontrollplaati, selle komponente ning põhjendusi, miks selline lahendus valiti. Juhtprogrammi osas seletatakse lahti graafiline kasutajaliides, mikrokontrolleri programm ja kirjeldatud, kuidas on kasutatud PID-kontrolli meetodid reaajas tagasisidega nii jõu- kui ka positsiooniandurilt.

Töö lõpu osas kirjeldatakse jõu- ja positsioonisensori kalibreerimist. Mõõtmise tulemused on esitatud graafikul ning samuti leiti ka võrrandeid, mis neid näite iseloomustab.

## 9. Kasutatud kirjandus

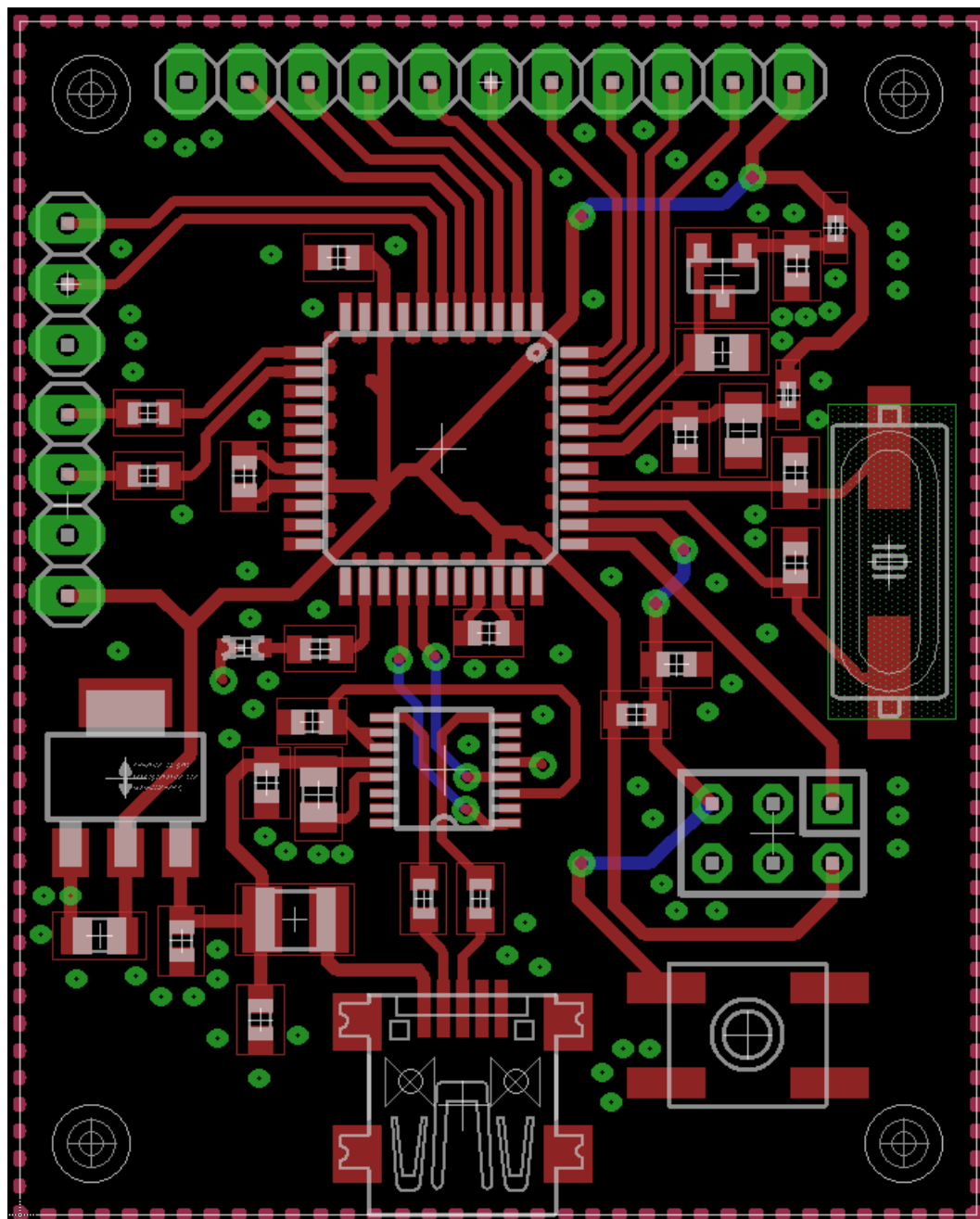
1. V. Palmre, D. Brandell, U. Mäeorg, J. Torop, O. Volobujeva, A. Punning, U. Johanson, A. Aabloo, "Ionic polymer metal composites with nanoporous carbon electrodes", Electroactive Polymer Actuators and Devices, 2010
2. I. Kleis, H. Arumäe, Rakendusmehaanika, 2001
3. Wikipedia, "Shear modulus", [Võrgumaterjal],  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Shear\\_modulus#/media/File:Shear\\_scherung.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Shear_modulus#/media/File:Shear_scherung.svg),  
(20.05.2016)
4. Atmel, "8/16-bit Atmel Xmega A4U Microcontroller ATxmega256A4U / ATxmega192A4U / ATxmega128A4U / ATxmega64A4U Datasheet",  
[http://www.atmel.com/images/atmel-8387-8-and16-bit-avr-microcontroller-xmega-a4u\\_datasheet.pdf](http://www.atmel.com/images/atmel-8387-8-and16-bit-avr-microcontroller-xmega-a4u_datasheet.pdf)
5. Panlab, "Transducers", [Võrgumaterjal],  
<http://www.panlab.com/en/products/transducers-panlab>, (20.05.2016)
6. Digital Weighing, "Types of load cells", [Võrgumaterjal],  
<http://digitalweighing.blogspot.com/2010/09/types-of-load-cells.html>, (20.05.2016)
7. Dircet Industry, "KTB82 series", [Võrgumaterjal],  
<http://www.directindustry.com/prod/megatron-elektronik-ag-co/product-13783-1027047.html> (20.05.2016)
8. Y.Hamd, V. Dhuru, "Physical and mechanical properties of pressure-molded and injection-molded denture base acrylics in different conditions", [Võrgumaterjal],  
<http://saudijos.org/article.asp?issn=1658-6816;year=2014;volume=1;issue=2;spage=65;epage=70;aulast=Shibat;type=3>  
(20.05.2016)
9. D. Kopeliovich, "Tensile test and Stress-Strain Diagram", [Võrgumaterjal],  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tensile\\_test\\_and\\_stress-strain\\_diagram](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=tensile_test_and_stress-strain_diagram) (20.05.2016)
10. NETZSCH DMA 242 E Artemis kasutusjuhend, 2014
11. Wikipedia, "Strain gauge", [Võrgumaterjal],  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Strain\\_gauge#/media/File:Strain\\_gauge.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/Strain_gauge#/media/File:Strain_gauge.svg)
12. National Instruments, "Strain Gauge Measurement – A Tutorial", [Võrgumaterjal],  
<http://www.ing.unp.edu.ar/electronica/asignaturas/ee016/anexo/r-an078.pdf>  
(20.05.2015)

13. D.Stefanescu, “Handbook of Force Transducers”, 2011
14. Southwest Center for Microsystems Education (SCME) “Wheatstone Bridge Participant Guide”, [Võrgumaterjal],  
[http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Read\\_assgn\\_13\\_Wheatstone\\_Bridge\\_Participant\\_Guide.pdf](http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Read_assgn_13_Wheatstone_Bridge_Participant_Guide.pdf) (20.05.2016)
15. A.Jürgenson, “Tugevusõpetus”, 1985
16. Pyserial teek, [Võrgumaterjal], <https://pypi.python.org/pypi/pyserial> (20.05.2016)
17. K.Menard, “Dynamic mechanical analysis”, 2008
18. J.Williams, “Bridge Circuits Marrying Gain and Balance”, [Võrgumaterjal],  
<http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an43f.pdf>, (20.05.2016)
19. Omega, “Introduction to Load Cells”, [Võrgumaterjal],  
<http://www.omega.com/prodinfo/loadcells.html> (20.05.2016)
20. I.Saveljev “Füüsika üldkursus”, 1978
21. Wikipedia, “Euler–Bernoulli beam theory”, [Võrgumaterjal],  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli\\_beam\\_theory](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler%E2%80%93Bernoulli_beam_theory),  
(20.05.2016)
22. Wikipedia, “Three point flexural test”, [Võrgumaterjal],  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile\\_testing](https://en.wikipedia.org/wiki/Tensile_testing), (20.05.2016)
23. TeachEngineering, “Lesson: Viscoelasticity”, [Võrgumaterjal],  
[https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub\\_surg\\_lesson04](https://www.teachengineering.org/lessons/view/cub_surg_lesson04) (20.05.2016)



## Lisad

### LISA 1. Trükkplaadi disain



Lisa 2 – moodleisse üles laetud zip faili sisu:

- Mikroprotsessorile laetud programm.
- Graafilise kasutajaliidese programm.
- Kontrollplaadi skeemi ja disaini failid.

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks**

Mina, Karl-Kristjan Kokk,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „DMA mõõtesead“e, mille juhendaja on Andres Punning,
  - 1.1.reprodutseerimiseks säilitamise ja üldsusele kättesaadavaks tegemise eesmärgil, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace-is lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;
  - 1.2.üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tartu Ülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace'i kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.
2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Tartus, **20.05.2016**